

JP 2005-512435 A 2005.4.28

(18) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公表特許公報 (A)

(11) 特許出願公表番号

特表2005-512435

(P2005-512435A)

(43) 公表日 平成17年4月28日 (2005.4.28)

(51) Int. Cl. 7

F I

テーマコード (参考)

H04B 7/10

H04B 7/10

A

5J021

H01Q 21/00

H01Q 21/00

5K059

H04B 7/08

H04B 7/08

D

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2003-551560 (P2003-551560)
 (86) (22) 出願日 平成14年12月5日 (2002.12.5)
 (85) 翻訳文提出日 平成16年6月4日 (2004.6.4)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2002/038614
 (87) 国際公開番号 W02003/050559
 (87) 国際公開日 平成15年6月19日 (2003.6.19)
 (31) 優先権主張番号 60/335,800
 (32) 優先日 平成13年12月5日 (2001.12.5)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 503148122
 ロッキード・マーティン・コーポレイシ
 ョン
 LOCKHEED MARTIN COR
 PORATION
 アメリカ合衆国、メリーランド州、ゲイタ
 ースバーグ、ノース・フレデリック・アベ
 ニュー 700
 700 N. Frederick Av
 enue, Gaithersburg,
 MD 20879, U. S. A.

(74) 代理人 100057874

弁理士 倉我 道昭

(74) 代理人 100110423

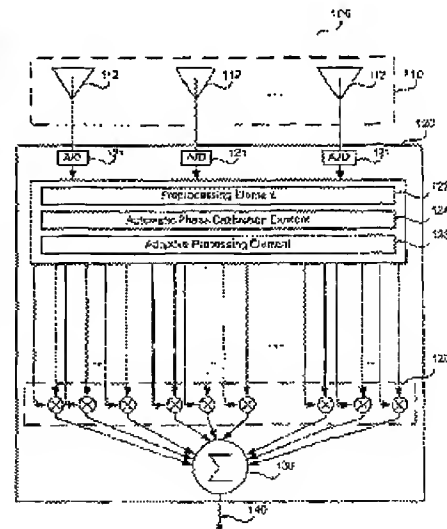
弁理士 倉我 道治

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 自動校正される縮小ランク適応プロセッサのためのシステムおよび方法

(57) 【要約】

本発明は、適応処理を自動位相較正と結合して受信信号の信号対雑音比を向上させる時空間適応処理 (STAP) システムおよび方法を述べる。適応処理を、データ行列の部分的特異値分解を介して共分散行列の因数分解の縮小ランク近似を計算することにより達成する。本発明によれば、白色雑音利得制約の計算には、雑音フロアの知識または設定は不要である。信号データを較正源として使用する自動位相較正を本発明による適応処理と結合することにより、信号対雑音比とクラッタ抑制とが提供され向上する。



(2)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

アンテナアレイによって受信されデータ行列に編成される信号を適応的に処理する、信号の信号対雑音比を向上させる信号処理システムであって、

アンテナアレイと、

信号プロセッサであって、前記アンテナアレイに接続され、前記受信信号の位相誤差を、前記受信信号を較正源として使用して補正する位相較正要素と、前記データ行列の部分的特異値分解から計算される共分散行列の因数分解の縮小ランク近似から適応重みを計算する適応処理要素と、を備えた信号プロセッサと、を具備する信号処理システム。

10

【請求項 2】

前記信号プロセッサは、前記受信信号をベースバンドにダウンコンバートし前記受信信号をマッチフィルタリングする前処理要素をさらに備える、請求項 1 に記載の信号処理システム。

【請求項 3】

前記信号プロセッサは、前記アレイアンテナによって受信される前記信号を変換する 1 つまたは複数のアナログ・デジタル変換器をさらに備える、請求項 1 に記載の信号処理システム。

【請求項 4】

前記信号プロセッサは、前記信号に前記適応重みを適用する乗算器をさらに備える、請求項 1 に記載の信号処理システム。

20

【請求項 5】

前記信号プロセッサは、前記適応的に重み付けされた信号を結合して前記受信信号を表す単一信号にする合計要素をさらに備える、請求項 5 に記載の信号処理システム。

【請求項 6】

アンテナアレイによって受信される信号を処理する、前記受信信号の信号対雑音比を向上させる方法であって、

前記受信信号の位相を自動的に較正することにより前記アンテナアレイにおける位相誤差を補正するステップと、

前記信号を適応的に処理するステップと、を含む信号を処理する方法。

30

【請求項 7】

前記受信信号の位相を自動的に較正する前記ステップは、ダイレクトプラストの遅延ビンを特定するステップと、前記受信信号を時間的に整合するステップと、をさらに含む、請求項 6 に記載の信号を処理する方法。

【請求項 8】

前記受信信号の位相を自動的に較正する前記ステップは、各パルスに対し前記アレイに渡って差分位相を計算するステップと、異常信号を除去するために前記パルスに渡ってメディアンフィルタリングするステップと、

40

をさらに含む、請求項 7 に記載の信号を処理する方法。

【請求項 9】

前記受信信号の位相を自動的に較正する前記ステップは、前記受信信号に対し平均差分位相を計算するステップと、前記受信信号に渡って前記平均差分位相を減算することにより位相誤差を表す結果としての位相を生成するステップと、

前記受信信号に渡って前記結果としての位相を統合することにより位相補正された信号を生成するステップと、をさらに含む、請求項 8 に記載の信号を処理する方法。

50

(3)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

【請求項 10】

前記受信信号の位相を自動的に校正する前記ステップは、前記受信信号を校正源として使用するステップをさらに含む、請求項 6 に記載の信号を処理する方法。

【請求項 11】

前記受信信号を適応的に処理する前記ステップは、前記受信信号をビームスペースに変換するステップをさらに含む、請求項 6 に記載の信号を処理する方法。

【請求項 12】

前記受信信号を適応的に処理する前記ステップは、前記受信信号をドップルスペースに変換するステップをさらに含む、請求項 11 に記載の信号を処理する方法。

【請求項 13】

前記受信信号を適応的に処理する前記ステップは、前記アレイに渡り指定された数のパルスに対してステアリングベクトルを計算するステップをさらに含む、請求項 6 に記載の信号を処理する方法。

【請求項 14】

前記受信信号を適応的に処理する前記ステップは、データ行列の部分的特異値分解により共分散行列の因数分解の縮小ランク近似を計算するステップをさらに含む、請求項 13 に記載の信号を処理する方法。

【請求項 15】

前記受信信号を適応的に処理する前記ステップは、
前記共分散行列から主固有値を分割するステップと、
前記共分散行列の前記主固有値を組み込むステップと、
ビーム依存白色雑音利得制約を計算するステップと、
前記主固有値を使用することにより前記適応重みを計算するステップと、
前記適応重みを前記受信信号に適用するステップと、
前記重み付き信号を合計するステップと、
をさらに含む、請求項 14 に記載の信号を処理する方法。

【請求項 16】

前記受信信号を適応的に処理する前記ステップは、
前記データ行列の特異値を分割するステップと、
ビーム依存白色雑音利得制約を計算するステップと、
前記特異値を使用することにより前記適応重みを計算するステップと、
前記適応重みを前記受信信号に適用するステップと、
前記重み付き信号を合計するステップと、
をさらに含む、請求項 14 に記載の信号を処理する方法。

【請求項 17】

前記受信信号を前処理するステップをさらに含む請求項 6 に記載の信号を処理する方法。

【請求項 18】

前記受信信号を前処理する前記ステップは、
前記受信信号をベースバンドにダウンコンバートするステップと、
前記コンバートされた受信信号をマッチフィルタリングするステップと、
を含む、請求項 17 に記載の信号を処理する方法。

【請求項 19】

所定期間に亘って前記受信信号のスナップショットからデータ行列を作成するステップをさらに含む請求項 6 に記載の信号を処理する方法。

【請求項 20】

前記受信信号を適応的に処理する前記ステップは、雑音フロアを計算することなく適応重みを計算するステップをさらに含む、請求項 6 に記載の信号を処理する方法。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】**

10

20

30

40

50

(4)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

【0001】

【発明の分野】

本発明は、アンテナアレイによって受信される電磁信号の信号対クラッタ比を改善するシステムおよび方法に関し、詳細には、アレイ較正誤差およびマルチパス干渉によって劣化する電磁信号の信号対クラッタ比を改善するシステムおよび方法に関する。

【0002】

【関連出願の相互参照】

本出願は、参照により本明細書に援用される、「System and Method for Auto Calibrated Reduced Rank Adaptive Processor」と題され2001年12月5日出願された、米国仮特許出願第60/335,800号の利益を請求する。

10

【0003】

【関連技術の論考】

アンテナアレイを使用して信号リターンを処理するさまざまな信号処理技術が開発されてきた。概して、信号とともに受信される干渉を低減する努力がなされる。干渉は、雑音、クラッタおよびジャミング等、所望の信号に干渉する任意の電磁エネルギーを含む可能性がある。航空機におけるような移動環境において受信機を使用する場合、環境雑音が増大する傾向がある。これらの望ましくない信号を抑制することは、特に困難であることが分かった。

【0004】

時空間適応処理 (space-time adaptive processing (STAP)) は、予測された目標 20
の方向におけるピークを増大させ、雑音または干渉源の方向における放射パターンにヌルを生成するように、アンテナアレイからのリターン信号のセットを重み付けすることにより、目標物体からのリターン信号を抽出するように設計された、特定の信号処理技術である。非適応的技術は一定の重みを使用するが、適応的技術は、リターン信号セットに基づいて重みを計算しようと試みる。

【0005】

適応重みを計算するために、STAP技術は、通常、指定された期間に渡りアレイ素子によって受信されたいくつかのパルスサンプルを結合する。概して、適応重みを、関係

【0006】

【数1】

30

$$R\vec{w} = \vec{s}$$

【0007】

によって計算する。ここで、

【0008】

【数2】

$$\vec{s}$$

40

【0009】

は、ビームステアリングベクトルであり、Rは共分散行列であり、

【0010】

【数3】

$$\vec{w}$$

【0011】

は、重みベクトルである。適応重みを識別するために、この関係を単に以下のように操作する。すなわち、

50

(5)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

【0012】

【数4】

$$\hat{w} = R^{-1} \hat{s}$$

【0013】

移動する物体を検出し追跡するために使用されるレーダ環境では、重みを計算し変更するプロセスをリアルタイムで行わなければならない。STAPは、通常、非静止環境において所与の量のデータによって推定することができる場合より、多くの適応パラメータを含む。自由度を低減した処理で得られるものを上回る性能改善を提供するために必要な精度まで、これらのパラメータを正確に推定するためには、単純にデータが不十分である。さらに、完全自由度リアルタイム処理に必要な処理は、極めて困難である。

【0014】

白色雑音利得制約は、縮小ランク (reduced rank) 計算を処理する場合に適応重みを計算するための一般的な方法である。ダイアゴナルローディング (diagonal loading) は、白色雑音利得制約のもっとも単純な形態であり、一般に使用されている。ダイアゴナルローディングは、背景雑音の有効な増大を抑止する二次制約を適用し、非常に非等方性の干渉の深いスルによる抑制を可能にする。

【0015】

適応重みに対する基本的な最適化パラメータは、以下の通りである。

【0016】

【数5】

$$\min_w w^H R w$$

$$s.t. w^H d = 1$$

$$w^H w \leq c$$

【0017】

ここで、

w = 適応重みベクトル、

d = 目標物体ステアリングベクトル

である。標準最適化により、結果としての適応重みを、共分散 R のダイアゴナルローディングを介して計算することができる。重みは、

$$w = \{ (R + \lambda I)^{-1} d \} / \{ d^H (R + \lambda I)^{-1} d \}$$

によって与えられる。ここで、 λ は、二次白色雑音利得制約 $w^H w \leq c$ を満足するために選択される最小の非負数である。 c の値を、雑音応答対干渉出力の低減をトレードオフするという点で所望のビームフォーマ (beamformer) 性能を与えるように調整する。 c の値を直接設定する代わりに、結果としての最適化は、雑音フロアを推定し雑音フロアを上回るか下回る $-10 \sim +10$ dB の範囲であるように λ を選択することによって、通常選択される λ の暗示的な h_e 値を扱う場合が多い。 c の値が明示的に与えられると、ラグランジュ乗数 λ に対する解は、ステアリングベクトル d に内在する方向によって決まる。

【0018】

二次白色雑音利得制約を計算するために単一の値 λ を使用することは一般的であるが、最適ではない。さらに、 c の値を選択して明示的に λ を解くことによるかまたは λ を明示的に選択することにより最適な白色雑音利得値を特定するために、雑音フロア (noise floor) の推定を実行しなければならない。

【0019】

10

20

30

40

50

(6)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

さらに信号処理を複雑化することには、アンテナアレイが受信する入力信号が、建設的および破壊的マルチパス干渉を示す非常に変化しやすい出力履歴を示す傾向にある。主ビーム信号と可干渉性であるマルチパスにより、信号キャンセルが発生する。これにより、積分の短い期間において重みが過度に「ハントする(hunt)」ことになる。積分期間が長いほどハンティングは低減するが、変化する干渉環境に対する反応が低速になる。さらに、アレイ較正誤差がサイドローブレベルを上昇させるため、クラッタ抑制が劣化し、それによりアレイステアリングベクトルが環境に適合しなくなる。

【0020】

さらに、これらの問題点は、モノスタティックシステムを使用するかバイスタティックシステムを使用するかに係らず存在するが、バイスタティックシステムにおける解決の方が、達成が極めて困難である。これらおよび他の理由のために、マルチパス環境において適応処理から改善されたクラッタ抑制を得ることは困難である。

【0021】

これらおよび他の欠点が、現行の適応処理システムに存在する。したがって、特にアンテナが受信した信号をより正確に計算するように設計された、縮小ランク適応処理システムおよび方法を提供する、これらの問題に対する解決法が必要である。

【0022】

【発明の要約】

したがって、本発明は、較正された縮小ランク適応処理を提供するシステムおよび方法に関する。特に、バイスタティックの場合において、本発明は、アンテナアレイによって受信された信号をその信号自体を較正源として使用して較正し、部分的特異値分解を通して共分散行列の縮小ランク近似から適応重みを計算することにより、適応的に信号を処理する。

【0023】

一実施形態において、本発明は、アンテナアレイによって受信されデータ行列に編成される信号を適応的に処理する、信号の信号対雑音比を向上させる信号処理システムであって、アンテナアレイと、アンテナアレイに接続され、受信信号の位相誤差を、受信信号を較正源として使用して補正する位相較正要素と、データ行列の部分的特異値分解から計算される共分散行列の因数分解の縮小ランク近似から適応重みを計算する適応処理要素と、を備えた信号プロセッサと、を具備する信号処理システムを含む。

【0024】

本発明のさらなる実施形態は、アンテナアレイによって受信される受信信号を処理する、受信信号の信号対雑音比を改善する方法であって、受信信号の位相を、位相誤差を補正するように自動的に較正するステップと、自由度を低減して信号を適応的に処理するステップと、を含む方法を含む。

【0025】

本発明のさらなる特徴および利点を、以下の説明において述べ、一部はその説明から明らかとなるであろうし、または発明の実施によって理解され得る。本発明の目的および他の利点は、添付図面とともに、記載された明細書およびその特許請求の範囲において特に示されている構成によって実現され達成されよう。

【0026】

上述した概略的な説明と以下の詳細な説明とはともに例示的かつ説明的であり、特許請求される発明のさらなる説明を提供するように意図されている。

【0027】

本発明のさらなる理解を提供するために含まれ本明細書に組み込まれその一部を構成する添付図面は、発明の実施形態を例示し、説明とともに、本発明の原理を説明する役割を果たす。

【0028】

【好ましい実施形態の詳細な説明】

ここで、本発明のさまざまな実施形態を詳細に参照する。それらの実施例を、添付図面

(7)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

に示す。

【0029】

図1は、本発明の実施形態による信号を適応的に処理するシステム100を示す。システム100は、アンテナアレイ110と、信号を適応的に処理する信号プロセッサ120と、を有する。アンテナアレイ110は、システム100かまたはシステム100によって使用される何らかの他の信号発生器によって送信され目標物体によって反射される信号を受信する複数のアレイ素子112を有する。すべてのアンテナと同様に、アンテナアレイ110はまた、周囲環境によって反射された信号を含む、システム100に近接して存在する任意の他の信号を、存在する可能性のあるジャミング信号等の他の干渉信号とともに、検出する。

10

【0030】

一実施形態では、信号プロセッサ120の1つまたは複数のアナログ・デジタル変換器121を使用して、アレイ素子112によって受信された信号を信号のデジタル表現に変換する。図1に示す本発明の実施形態の信号プロセッサ120はまた、前処理要素122と、自動位相校正要素124と、適応処理要素126と、を有する。

【0031】

本発明の実施形態によれば、アンテナアレイ110が受信した信号を、前処理要素122によって前処理する。前処理要素122は、受信した信号パルスのベースバンドおよびマッチドフィルタリング（パルス圧縮）へのダウンコンバージョンを実行する。

【0032】

自動位相校正要素124は、結果としてのアレイ素子信号のセットを位相校正する。位相校正は、アレイ素子112における位相誤差を考慮し、それによって適応処理される信号を補正する。本発明は、位相校正のために受信信号を使用することにより利益を得る。

20

【0033】

一実施形態では、位相校正要素124は、各アレイ素子信号のダイレクトブラスト (direct blast) の遅延ビン (delay bin) の位置を特定し、各アレイ素子からの信号をシフトさせることによりダイレクトブラスト発生を時間的に整合する。信号が時間的に整合されると、位相校正要素124は、各パルスに対しアレイに渡って差分位相を計算する。パルスに渡るメディアンフィルタリングを使用して、いかなる異常信号も除去する。平面波到来の方向を表す平均差分位相を減算する。結果としての差分位相は、任意のアレイ位相誤差による。そして、結果としての位相をアレイ素子に渡って統合する (integrate) ことにより、入来データの各要素に対し補正された位相を生成する。

30

【0034】

位相校正要素124のさらなる実施形態は、目標対象からの二次反射を二次校正源として推定してもよい。また、本発明の実施形態は、アレイ校正要素120をバイパスすることにより、またはそれをまったく除去することにより、位相校正を排除してもよい、ということも理解することができる。

【0035】

本発明の実施形態の適応処理要素126は、前処理され校正されたアレイ素子信号を適応的に処理して、受信信号のそのセットに対して信号対雑音比を向上させる。1つの別の実施形態は、信号を適応的に処理する前にビームスペースを縮小することができる。信号データを、適応処理要素126によって、顕著なエネルギーの局所化領域を識別し適応処理のために縮小ビームセットを展開する従来の処理を介して、ビームスペースに変換してもよい。さらなる別の実施形態は、エレメントスペースの自由度を低減することができる。

40

【0036】

このように、自由度の低減を、2つの別個の方法のうちの1つで達成してもよい。すなわち、1) ビームスペースへの縮小および縮小ビームセットを適応処理への入力として割り付けること、または2) データ行列の特異値と特異ベクトルとの一部のみを使用することによるエレメントスペースの自由度の低減である。目標物体のステアリングベクトルが

50

(8)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

定義された後、適応処理は、エレメントスペースかビームスペースかに係らず同様に続ける。

【0037】

本発明の適応処理を、K個のデータスナップショットを結合することによって形成されるデータ行列の部分的特異値分解を介して、サンプル共分散行列

【0038】

【数6】

$$\hat{R}$$

10

【0039】

の因数分解の縮小ランク近似を計算することによって達成する。各スナップショットは、指定された数のパルスに対する事前設定された期間に渡る信号リターンから構成される。

【0040】

適応処理要素126は、共分散行列Rとステアリングベクトルdとの計算に基づいてビーム依存白色雑音利得制約を計算することにより、適応重みを公式化する。本発明によれば、ビーム依存白色雑音利得制約の計算には、雑音フロアの知識は必要でなく、そのため雑音フロアを推定するために必要ないかなる計算もなくす。定数c、すなわち白色雑音利得制約を、 $c = \beta / d^d$ 、 $\beta = 10^{\delta / 10}$ として選択する。ここで、 δ を、通常3〜6の範囲の数から選択する。これにより、ビームフォーマの白色雑音抑制能力の3〜6 dB劣化をもたらす従来のシェーディングされていないビームフォーミングされた出力の白色雑音レベルに対して、3〜6 dBの増大が可能になる。本発明は、雑音フロアに対する分析モデルを使用して、問題のある可能性のある、雑音フロアを推定する必要をなくす。ビームセットに対しビーム依存白色雑音利得制約が計算されると、それらを、乗算器128によって受信信号に適用し、適応プロセッサ120の加算要素130は、結果としての信号を合計することにより、結合されたビームセットに対する単一出力信号140を作成する。

【0041】

アレイ較正を適応処理と結合することにより、信号利得を改善し較正誤差およびマルチパス干渉の影響を含む雑音を無効にする本発明の能力が強化される。さらに、前処理により、処理負荷全体が低減し、環境雑音のクラッタ中およびジャミング中において目標物体の信号リターンを特定する際の効率が上昇することが可能になる。本発明は、モノスタティックおよびバイスタティック環境の両方において適用可能であるが、特に、バイスタティック環境における解決法を提供するために有益である。

【0042】

図2は、本発明による全般的な信号処理の流れを示すフローチャート200である。特に、プロセスは、ステップ210においてアンテナアレイが信号を受信した時に開始する。ステップ220において、受信信号をデジタルからアナログに変換する。デジタル信号処理230は、デジタル信号を処理して、信号対雑音比が向上した単一信号をもたらす。

【0043】

本発明の一実施形態では、デジタル信号処理ステップ230は、前処理ステップ300と、その後の自動位相較正ステップ400と、適応処理ステップ500と、を含む。非適応前処理ステップ300は、受信パルスのマッチドフィルタリング(matched filtering)またはパルス圧縮を実行することにより、信号対雑音比を増大させ分解能を範囲内で向上させる。自動較正ステップ400は、アンテナアレイ素子に関連する位相誤差を補正する。適応処理ステップ500は、信号を適応的に処理する。それは、次元を縮小するステップを含んでもよい。一実施形態では、適応処理ステップ500は、エレメントスペースデータを利用し、その後、信号に適用される白色雑音利得制約を生成する。別の実施形態では、適応処理ステップ500は、データをエレメントスペースからビームスペースに変換することにより、エネルギーを縮小ビームセットにおいて局所化し、その後、信号に適用

(9)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

される白色雑音利得制約を生成する。ビームスペースであるかエレメントスペースであるかに係らず、白色雑音利得制約を同様に生成する。本発明の自動位相較正と適応処理との組合せにより、信号利得の向上と信号干渉の高性能スル化を達成する改善された信号対雑音比が提供される。

【0044】

図3は、非適応処理ステップ300をより詳細に説明する。前処理中、ステップ310において、受信信号をベースバンドにダウンコンバートまたはダウンモジュレートし、ステップ320において、送信パルスのベースバンドバージョンの複製を用いて、各ベースバンドパルスをマッチドフィルタリングするかまたはパルス圧縮する。このような前処理により、信号対雑音比が増大し、そのレンジの範囲において分解能を大幅に向上させることができる。

【0045】

図4は、ステップ400の自動位相較正をより詳細に説明する。図2に示すステップ500の適応処理と結合した自動位相較正により、可干渉マルチパスおよび位相誤差の影響をスル化する能力を向上させることによって白色雑音利得制約の効率が向上する。さらに、位相較正により、アレイ素子がおおよそ同じ出力および一定の差分位相を有することが保証され、信号データが間違っているか否かを判断するために信号を検査する方法が提供される。

【0046】

図4を参照すると、自動位相較正ステップ400において、プロセスはステップ410で開始し、局所化エネルギーのダイレクトブラストを含むレンジビン(range bin)を特定しそれを較正源として使用する。ステップ415においてアレイ素子の信号をシフトさせることにより、ダイレクトブラスト発生を時間的に整合する。ダイレクトブラストは、特定の方向から到来する平面波を表す。これは、アレイ素子に渡る一定の差分位相を意味する。この一定の差分位相からの偏差は、アンテナアレイにおける位相誤差を示す。

【0047】

次に、ステップ420において、アレイに渡り各パルスに対して差分位相を計算する。そして、ステップ430において、パルスに渡るメディアンフィルタリングを使用することにより、いかなる異常信号も除去する。ステップ440において、平面波到来の方向を表す平均差分位相を計算し、ステップ450において減算することにより、アレイ位相誤差による差分位相をもたらす。そして、ステップ460において、アレイ素子に渡ってこの位相を統合することにより、入来データの各素子に対する補正位相を生成する。

【0048】

図5は、ステップ500の適応処理をより詳細に説明する。本発明の適応処理ステップ500は、共分散行列の因数分解の縮小ランク近似を利用することによりおよび推定雑音フロアの使用を不要にすることにより、暗示される共分散推定とそこから計算される適応重みおよびサイドロープレベルとの安定性を向上させる。さらに、図2に示す自動位相較正ステップ400を適応処理ステップ500と結合することにより、マルチパス信号と位相誤差との影響をスル化する効力を向上させることによって、本発明によって達成されるクラッタ抑制が強化される。

【0049】

上述したように、適応重みは、式 $w = \{ (R + \lambda I) \}^{-1} d / \{ d^H (R + \lambda I) \}^{-1} d$ に基づく。ここで、 λ は β と δ を使用して計算する。複素数ベースバンドのマッチドフィルタリングされたデータに対する目標モデルを、

【0050】

【数7】

$$x_n(t) = As(t - \tau_n) e^{-j(\omega_0 + \omega_d)t} \approx As(t - \tau_0) e^{-j(\omega_0 + \omega_d)t} \approx \tilde{A}s(t - \tau_0) e^{-j(\omega_0 \delta_d + \omega_d \tau_0)}$$

【0051】

50

(10)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

として表すことができる。ここで、

$x_n(t)$ = 第 n 素子信号、

$s(t)$ = 圧縮パルス、

A = その複素数振幅、

τ_n = 第 n 素子の時間遅延、

ω_0 = パルスの中心周波数、および

ω_d = 目標ドップラ周波数

である。

【0052】

時間遅延 τ_n を、複素数スカラー A に吸収させることにより

19

【0053】

【数8】

$$\tilde{A}$$

【0054】

を生成することができるすべての素子に共通するバルク遅延 τ_0 と、基準素子に対する差分時間遅延 $\delta\tau_n$ と、に分割することができる。

【0055】

【数9】

20

$$\tilde{A}s(t-\tau_0) \equiv \alpha(\tau_0)$$

【0056】

は、 $t + \tau_0$ 。近くのみサポートするため、この遅延は、目標レンジを表し、それにより、 $x_n(t)$ は、1 パルスに関連する期間 $t \in [0, T]$ 内のすべての目標およびクラッタからの反射を表す。単一レンジ $\tau_0 = \tau$ 、 $+mT$ に対応する複数パルスの場合があり、ここで τ_1 は、第1パルスの目標に対する時間遅延である。このため、目標に対するモデルは、次のようになる。

【0057】

【数10】

30

$$x_{nm}(t) + \alpha(t)e^{-j(\omega_0\delta\tau_n + m\omega_d T)}$$

【0058】

素子間の間隔 Δ を有するリニアアレイに対する差分空間時間遅延 $\delta\tau_n$ は、 $\omega_0 \delta\tau_n = -[1/2\pi\Delta(n-1)]/\lambda \sin(\theta) = (n-1)\pi\Delta$ によって与えられる。ここで、 θ は、アレイブロードサイドからの角度（すなわち、円錐角の余角）である。これにより、スナッチショット x_1 は、

【0059】

40

(11)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

【数 1 1】

$$x_i = \begin{bmatrix} x_{11}(t) \\ x_{21}(t) \\ \vdots \\ x_{12}(t) \\ x_{22}(t) \\ \vdots \\ x_{nm}(t) \end{bmatrix}$$

10

【0 0 6 0】

となる。ここで、 x は時刻 t に関連する。時刻 t は、レンジまたはバースタティックレンジと相関し、 N 個の素子の場合 $n = 1, 2, \dots, N$ であり、 M 個のパルスの場合 $m = 1, 2, \dots, M$ である。

【0 0 6 1】

図 5 を参照すると、本発明の一実施形態において、ステップ 5 0 4 は、任意選択で、顕著なエネルギーの局所化領域を識別し縮小ビームセットを展開する従来の処理により、信号データをビームスペースに変換してもよい。本発明のさらなる実施形態では、ステップ 5 0 6 は、任意選択で、信号データをドップラスペース(Doppler space)に変換してもよい。

【0 0 6 2】

ステップ 5 1 0 において、目標物体に関連するステアリングベクトルを、次のように計算する。

【0 0 6 3】

【数 1 2】

30

$$d(\omega, \nu) = b(\omega) \otimes a(\nu)$$

【0 0 6 4】

ここで、

【0 0 6 5】

(12)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

【数 1 3】

$$b(\omega) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\omega T} \\ \vdots \\ e^{-j(M-1)\omega T} \end{bmatrix}$$

$$a(v) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-jv\Delta} \\ \vdots \\ e^{-j(N-1)v\Delta} \end{bmatrix}$$

19

【0 0 6 6】

である。

【0 0 6 7】

20

本発明のドップラ後適応ビームフォーマ(post Doppler adaptive beamformer)実施形態では、ステップ506におけるドップラ空間への非適応変換を、複数のパルスに渡って高速フーリエ変換(FFT)によって行い、計算を節約して次元の大幅な縮小を達成する。これにより、ステアリングベクトルを $d = a(v) = a(\omega \sin \theta / c)$ まで縮小する。ここで、新たなステアリングベクトルセットを、すべての角度に対し、新たなドップラ周波数 ω の各々に対して計算し、STAP問題を、次元NのMドップラ後適応ビームフォーミング問題にまで縮小する。

【0 0 6 8】

そして、以下により、ステップ520において与えられたデータ行列Xの部分的特異値分解により、Rの縮小ランク近似を達成する。すなわち、

30

$$K < \dim(d)$$

である場合、

【0 0 6 9】

【数 1 4】

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_K] = U \Sigma V^H = U \begin{bmatrix} \Sigma_r \\ 0 \end{bmatrix} V^H$$

【0 0 7 0】

であり、ここで、

40

【0 0 7 1】

【数 1 5】

$$x_i = x_{t|_{t=(i-1)\Delta t}}$$

【0 0 7 2】

である。この分解により、次のようにRの固有分解の推定値が得られる。

【0 0 7 3】

50

(13)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

【数 1 6】

$$\hat{R} = \frac{1}{K} X X^H = \frac{1}{K} U \Sigma \Sigma^T U^H$$

【0 0 7 4】

そして、プロセスはステップ 5 3 0 に進み、そこで

【0 0 7 5】

【数 1 7】

$$\hat{R}$$

19

【0 0 7 6】

の主固有値(dominant eigenvalue)を分割することにより、

【0 0 7 7】

【数 1 8】

$$\Lambda = \Sigma \Sigma^T = \begin{bmatrix} \Lambda_s & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

20

【0 0 7 8】

がもたらされる。次に、ステップ 5 4 0 において、適応重みを、これらの主固有値を用いて公式化することにより、

$$w = |U (\Lambda + \lambda I)^{-1} U^H d| / |d^H U (\Lambda + \lambda I)^{-1} U^H d| = |U (\Lambda + \lambda I)^{-1} z| / |z^H U (\Lambda + \lambda I)^{-1} z| \quad z = U^H d$$

がもたらされる。

【0 0 7 9】

ステップ 5 6 0 において、U の単一特性(unitary properties)を使用しておよび U の第 i 列に対する表記 u_i を使用して、X の非ゼロ特異値に関連する最初の p 列により、次のように重み w に対する解が得られる。

【0 0 8 0】

【数 1 9】

$$w = \frac{d - \sum_{i=1}^p \frac{\lambda_{si}}{\lambda_{si} + \lambda} z_i u_i}{d^H d - \sum_{i=1}^p \frac{\lambda_{si}}{\lambda_{si} + \lambda} |z_i|^2}$$

40

【0 0 8 1】

ここで、

 $z_i = z$ の第 i 成分、および $\lambda_{si} = \Lambda_s$ の第 i 対角成分

である。この形式には、効率のためにデータ行列の部分的特異値分解があればよい。ステップショットが制限される場合、この種の規則化により、重み推定の安定性が得られる。

【0 0 8 2】

ステップ 5 5 0 における λ 、すなわち白色雑音利得制約で使用される最適化のラグランジュ乗数の計算を、ニュートン (Newton) タイプの漸化式として定式化することができる。永年方程式により、

50

(14)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

$f(\lambda) = w^H(\lambda) w(\lambda) - c = 0$; $c = 10^{20} / 10 / d^H d$
 が得られる。 $f(\lambda)$ は単調関数であるため、解は、

$\lambda_{k+1} = \lambda_k - f(\lambda_k) / f'(\lambda_k)$
 として与えられる。

【0083】

【数20】

$$w^H w = \frac{n(\lambda)}{d(\lambda)} = \frac{\sum_{i=1}^L \frac{|z_i|^2}{\lambda_i^2}}{\left[\sum_{i=1}^L \frac{|z_i|}{\lambda_i} \right]^2}; \quad \lambda_i = \lambda_{si} + \lambda; \quad L = \dim(d) \quad 10$$

【0084】

とし、これを微分することにより、

【0085】

【数21】

$$f'(\lambda) = \frac{d(\lambda)n'(\lambda) - n(\lambda)d'(\lambda)}{d^2(\lambda)} \quad 20$$

$$n'(\lambda) = -2 \sum_{i=1}^L \frac{|z_i|^2}{\lambda_i^3}$$

$$d'(\lambda) = -2n(\lambda)g(\lambda), \quad g(\lambda) = \sum_{i=1}^L \frac{|z_i|^2}{\lambda_i} \quad 30$$

【0086】

をもたらすことができる。

【0087】

識別

【0088】

【数22】

$$\sum_{i=1}^L |z_i|^2 = d^H d = \sum_{i=1}^p |z_i|^2 + \sum_{i=p+1}^L |z_i|^2 \quad 40$$

【0089】

を使用することにより、および $i \geq p$ において $\lambda_i = \lambda$ であると留意することにより、合計を1からpまでの和に変換することができる。また、この特定の場合では、 $d^H d = L = \dim(d)$ であるが、 $d^H d \neq L$ である場合であっても適応重みに対する公式は有効である。pの値は、概して約3から $L/2$ までの範囲であり、クラック抑制に対して最良の値を提供するように選択されるが、スナップショットの数Kを厳密に下回る。

【0090】

そして、ステップ570において、ステップ580において信号の合計に使用される各信号に対し適応重みを適用する。合計された信号は、信号対クラック比が改善された目標 50

(15)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

物体からのリターンを表す単一信号を提供する。このため、本発明は、信号対クラッタ比を向上させ信号利得を維持することにより目標物体の位置を特定する精度を向上させる。

【0091】

当業者には、本発明の精神または範囲から逸脱することなく本発明においてさまざまな変更および変形を行うことができる、ということが明らかとなる。そのため、本発明は、任意の特許請求項とそれらの等価物との範囲内にあるこの発明の変更および変形を包含することが意図されている。

【図面の簡単な説明】

【0092】

【図1】 本発明の実施形態による信号を適応的に処理するシステムの図である。

10

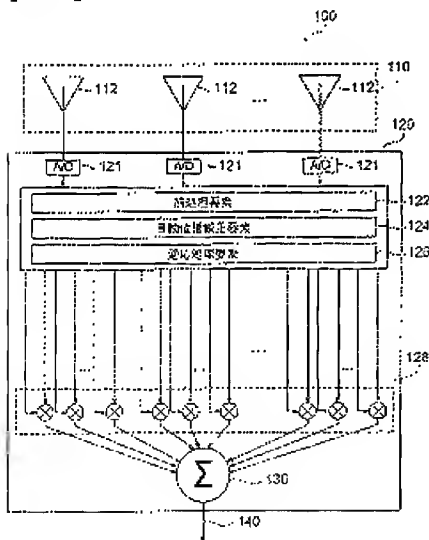
【図2】 本発明の実施形態による適応信号処理のプロセスフローを示すフローチャートである。

【図3】 本発明の実施形態による非適応前処理のプロセスを示す図である。

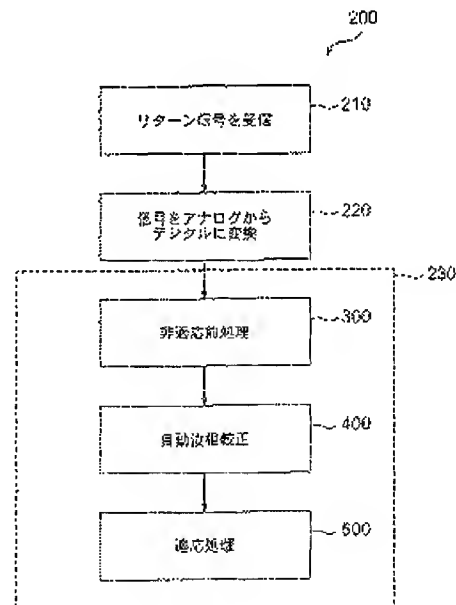
【図4】 本発明の実施形態による自動位相校正のプロセスを示す図である。

【図5】 本発明の実施形態による適応処理のプロセスを示す図である。

【図1】



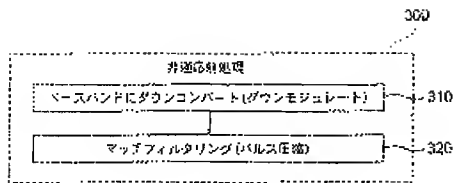
【図2】



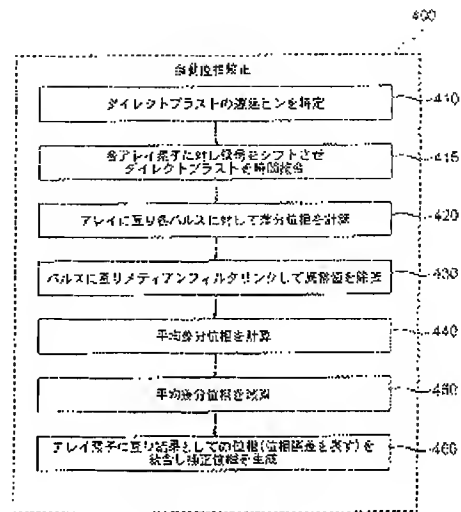
(16)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

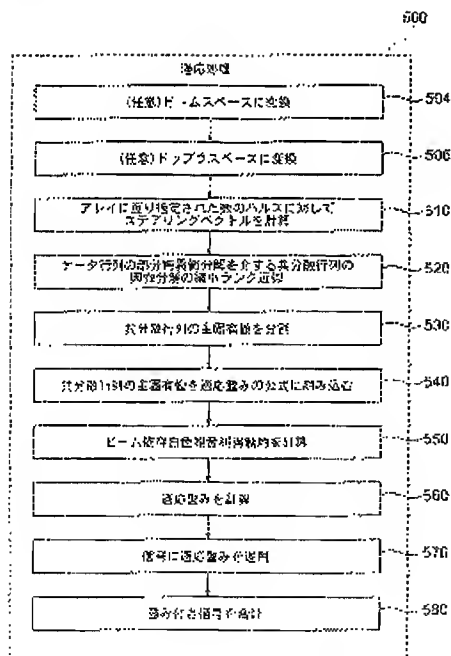
【図 3】



【図 4】



【図 5】



(17)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Date of application for

PCT/US 02/38614

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G01S3/72 //H01Q3/00,G01S13/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classifications and IPC.

B. FIELD SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G01S H01Q

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the field searched

Electronic data bases consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

INSPEC, WPI Data, PAJ, EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>REED I S ET AL: "Multidisciplinary perspective on adaptive sensor array processing"</p> <p>IEEE PROCEEDINGS-RADAR, SONAR AND NAVIGATION, OCT. 1999, IEEE, UK, vol. 146, no. 5, pages 221-234, XP002234734</p> <p>ISSN: 1350-2395</p> <p>abstract</p> <p>paragraph [0002]</p> <p>---</p> <p>-/--</p>	1-20

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.☐ Patent family members are listed as annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" documents which may throw doubts on priority claims for which it is cited to establish the publication date of another claim or other special reason (as specified)

"O" document relating to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"T" documents published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"I" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"G" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

14 March 2003

Date of making of the international search report

01 04 2003

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P. B. 6815 Patentpark 2

MIL - 2200 INVA Rijswijk

Tel (+31-70) 340-2040, Tx 31 651 990-01

Fax (+31-70) 340-2016

Authorized officer

ÅSA HÄLLGREN/JA A

Form PCT/ISA/210 (second sheet) July 1992

page 1 of 2

(18)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		Index rel. Application No. PCT/US 02/38614
C. (Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of its relevant passages	Relevant to claim No.
A	GUERCI J R ET AL: "Optimal and adaptive reduced-rank STAP" IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS, APRIL 2000, IEEE, USA, vol. 36, no. 2, pages 647-663, XP002234735 ISSN: 0018-9251 abstract paragraph [0003] ---	1-20
A	ROBEY F C ET AL: "Array calibration and modeling of steering vectors" CONFERENCE RECORD OF THIRTY-FIFTH ASILOMAR CONFERENCE ON SIGNALS, SYSTEMS AND COMPUTERS (CAT.NO.01CH37256), CONFERENCE RECORD, THIRTY-FIFTH ASILOMAR CONFERENCE ON SIGNALS, SYSTEMS AND COMPUTERS, PACIFIC GROVE, CA, USA, 4-7 NOV. 2001, pages 1121-1126 vol.2, XP002234736 2001, Piscataway, NJ, USA, IEEE, USA ISBN: 0-7803-7147-X abstract paragraph [0001] -----	1-20

Form PCT/ISA(21) (continuation of second sheet) July 1992

page 2 of 2

(19)

JP 2005-512435 A 2005.4.28

フロントページの続き

(81)指定国 AP(GH,GM,KE,LS,MW,MZ,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,IE,IT,LU,MC,NL,PT,SE,SI,SK,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GN,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BR,BY,BZ,CA,CH,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DZ,EC,EE,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,HR,HU,ID,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KP,KR,KZ,LC,LK,LR,LS,LT,LU,LV,MA,MD,MG,MK,MN,MP,MX,MZ,NO,NZ,OM,PH,PL,PT,RO,RU,SC,SD,SE,SG,SK,SL,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,UZ,VC,VN,YU,ZA,ZM,ZW

(74)代理人 100084010

弁理士 古川 秀利

(74)代理人 100094695

弁理士 鈴木 憲七

(74)代理人 100111648

弁理士 鶴並 順

(72)発明者 レートマキ、ノーマン・エイ

アメリカ合衆国、ワシントン州、エドモングス、エス・ダブリュ、ブレイス、ワンハンドレッドサード
ティシックス 6227

(72)発明者 ベイカー、グレゴリー・エイ

アメリカ合衆国、コロラド州、コロラド・スプリングズ、ヴァンティジ・ヴィスタ・ドライブ 5
547

(72)発明者 ディヴァイン、ドワイト・ザ・サード

アメリカ合衆国、メリーランド州、ロックヴィル、チェリー・ヴァレー・ドライブ 4628

Fターム(参考) 5J021 AA05 AA06 FA00 FA05 FA13 FA14 FA15 FA16 FA23 HA05

SK059 CC03 CC04 DD31 DD32
